Ferdowsi Civil Engineering, 38, 1, 2025. (115-130)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Improving the Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures Against Moisture Damage Using Rejuvenators

Research Article

Hamidreza Eftekhari [1], Paraham Hayati [2], Ali Moniri [3]

DOI: 10.22067/jfcei.2025.91390.1334

1- Introduction

The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in asphalt mixtures is becoming increasingly popular due to economic and environmental benefits. However, the most important challenge in using asphalt mixtures with a high percentage of RAP is the degradation of the bitumen in the RAP, which, due to oxidation of the bitumen and the passage of time, increases its hardness, changes its physical and chemical properties, and reduces its efficiency. Inadequate performance of asphalt mixtures with proper in-situ compaction can lead to the formation of fine cracks and premature failure of the in-situ pavement surface. Many researchers believe that due to the layered structure of bitumen in asphalt chips, bitumen always adheres to the chips and creates dark-colored aggregates. This bitumen never separates from the aggregates and prevents water from entering the asphalt chip aggregates, so the chips will not have any problems with moisture sensitivity. Previous research results have shown that this is partly true, that asphalt crumb materials do not perform as well as dark aggregates in combination with new bitumen, and the type of aggregate can be influential. This issue has not been studied in detail to date, and the effect of the relationship between the degree of denudation before asphalt recycling and the degree of denudation after asphalt recycling has not been studied. Examining this issue could lead road construction professionals and those active in the asphalt recycling industry to be more sensitive to issues such as denudation and moisture sensitivity when designing recycled asphalt mixtures. Therefore, in the present study, in addition to examining the effect of different asphalt chip materials, the effect of moisture damage in asphalt chips on the moisture sensitivity of recycled asphalt mixtures and the effect of using various rejuvenating agents used in recycled asphalt mixtures on the moisture sensitivity of these mixtures are investigated.

2- Methodology

One of the vital infrastructures in the development and progress of any country is the construction of high-quality roads with a long service life. The service life of road pavement has a fundamental impact on the economy of any society and is recognized as one of the national assets; therefore, any damage to it will lead to a reduction in the service life of the pavement and an increase in its related costs. Therefore, to maintain and maintain urban and suburban roads for a long time, many roads need to be repaired and reconstructed. On the other hand, the budgets allocated for pavement maintenance are not sufficient and conventional and costly methods have delayed the timely improvement of roads and reduced the quality and services provided by pavements. Studies show that the use of asphalt recycling technology before the complete destruction of asphalt layers significantly reduces maintenance costs. In conducting this research, we faced certain limitations such as laboratory facilities, project financial resources, etc.; therefore, the hypotheses and framework of the study were adjusted in such a way that appropriate and practical results could be achieved despite the existing limitations. Accordingly, in this research, four RAPs with percentages of 25, 50, 75, and 100 and three types of rejuvenators from different groups of rejuvenators were used. To determine the optimal percentage of rejuvenators, aged asphalt of recycled mixtures (RAP) was extracted and then the optimal percentage of each rejuvenator was determined using conventional bitumen tests (permeation degree and softening point). By evaluating the effect of the design material structure on the volumetric properties of asphalt mixtures, the structure and granulation that meets the needs of the mixing design and pavement system were selected from among the different aggregates. By selecting the design material grading, asphalt samples were prepared to determine the optimal percentage of different asphalt mixture conditions, using the requirements and standards of the Marshall mixing

*Manuscript received December 29, 2024, Revised February 23, 2025, Accepted May 11, 2025

[1] Ph.D. Student Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

[2] Corresponding author. Assistant professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, **Email**: p.hayati@modares.ac.ir

[3] Assistant professor, Department of Civil and Environmental Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, **Email**:Ali.moniri1@gmail.com

plan. Then, for the obtained optimal bitumen percentages, samples were prepared in specific dimensions according to the standard of each type of test using a Marshall electric hammer compactor, and the manufactured samples were subjected to loading by the desired devices to evaluate mechanical properties. Finally, the results of each of the tests performed are presented and discussed.

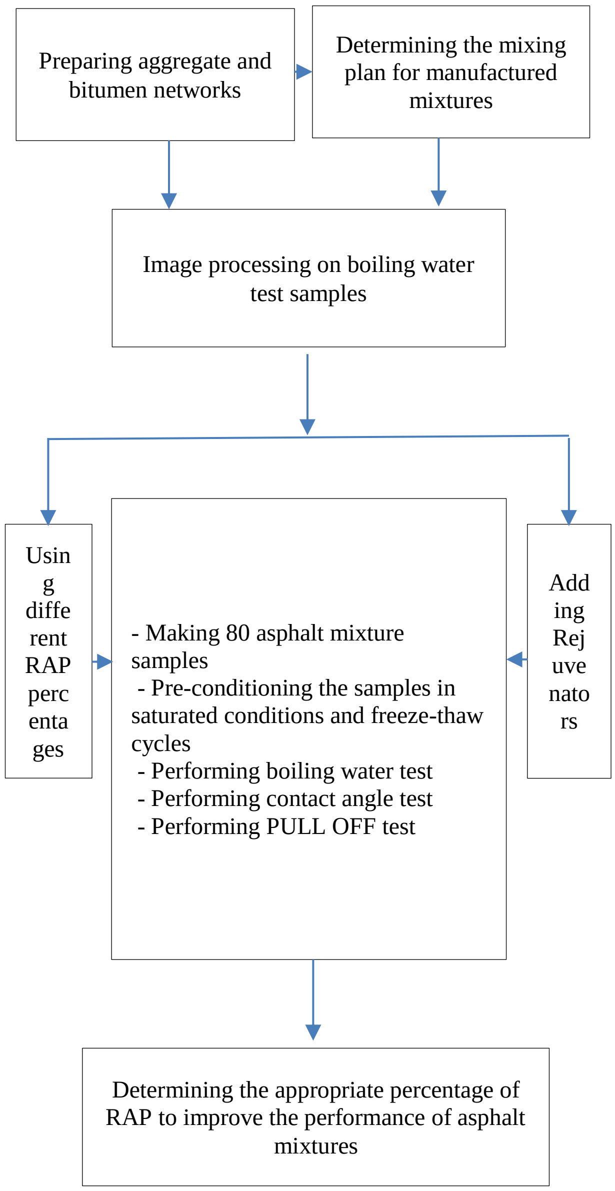


Fig. 1. Steps of the research method used in this study.

3- Results

In this section, the results obtained from various experiments on recycled asphalt mixtures containing different percentages of different chips from urban roads in the two provinces of Mazandaran and Golestan, and the Hemmat and Babaei highways, and the three rejuvenators of sunflower oil, cyclogen, and vacuum batum are presented.

The results of the adhesion and cohesion strength in the PULL OFF test of the mixtures made in dry and wet conditions show that limestone has higher adhesion and cohesion values with the base bitumen in both dry and wet conditions and in all four types of aggregates. However, with the addition of a rejuvenator, the adhesion and cohesion strength in the dry state of limestone decreases and increases in the wet state; therefore, it can be stated that the addition of rejuvenators to recycled bitumens can have a significant effect on increasing adhesion. Also, the use of recycled chips with different percentages and different rejuvenators can help improve the performance of asphalt against tensile forces.

The results of the surface free energy measurements of the bitumens used in this study show that the rejuvenator-modified bitumen has a higher total surface free energy compared to the base bitumen, which causes this bitumen to experience less cohesion failure compared to the base bitumen. The surface free energy measurements of the bitumens from different samples showed significant differences. The rejuvenator-modified bitumens showed that they have a higher surface free energy, which could mean improved adhesion properties and reduced probability of failure between aggregates. Comparison of the results with the data available in the literature showed that increasing the percentage of rejuvenator effectively affects the stability and performance of asphalt. In other words, the findings of the present study indicate the improvement of asphalt performance by using rejuvenator compounds and recycled chips.

4- Conclusion

The most important results obtained from this study are briefly stated below:

- Samples with calcareous chert had the highest chert coverage (80.618 percent) and siliceous chert with a coverage of 51.340 percent resulted in the lowest coverage.
- According to the results of the moisture sensitivity test, mixtures containing limestone and asphalt recycling materials have greater resistance to moisture damage with increasing RAP percentage, and cyclogen rejuvenator can also be more effective than other rejuvenating materials, but with increasing RAP percentage, the performance of the rejuvenators becomes completely homogeneous.
- By examining the results of the PULL OFF test, it can be concluded that the use of rejuvenators, especially cyclogen, in modifying the surface of limestone leads to increased adhesion and cohesion. These can be used to improve the performance of stone materials.
- The results of measuring the surface free energy components of the bitumens used in this study show that the bitumen modified with a rejuvenator has a higher total surface free energy compared to the base bitumen, which causes this bitumen to experience less cohesion failure compared to the base bitumen.
- Multivariate regression model for predicting moisture deterioration behavior of recycled asphalt mixtures shows that variables such as recovery percentage (RAP), sand index, and Gastel index have a large impact on TSR values, and these variables are more sensitive to moisture changes. The TSR model is presented with high accuracy and low error, which indicates the good performance of the model in predicting moisture deterioration behavior of recycled asphalt mixtures.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

بهبود عملکرد مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه های بازیافتی و مواد جوانساز در مقابل خرابی رطوبتی*

مقاله پژوهشی

حمیدرضا افتخاری[۱]   پرهام حیاتی[۲]   علی منیری[۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2025.91390.1334

چکیده در این تحقیق، تأثیر تراشه‌های آسفالتی بازیافتی، درصد استفاده از آنها و جوانسازهای روغنی بر خصوصیات خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. قیر مورد استفاده در این تحقیق، از نوع PG 64-16 می‌باشد. این تحقیق شامل ترکیبات مختلف با درصدهای مختلف تراشه و جوانساز بوده است. به منظور تعیین پارامترهای وقوع خرابی رطوبتی، آزمایشات انرژی آب سطحی بر روی قیر و آزمایش آب جوشان (به همراه پردازش تصویر جهت تحلیل میزان خرابی) و PULL OFF بر روی مخلوط های حاوی تراشه‌های آسفالتی بازیافتی انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات در ترکیب تراشه‌ها و افزودن جوانسازها تأثیر قابل توجهی بر مقاومت مخلوط‌ها در برابر خرابی رطوبتی دارند. همچنین مخلوط های آسفالتی حاوی سنگ آهک در هر دو شرایط خشک و تر دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری با قیر پایه می باشد. اما با اضافه شدن جوانساز مقاومت چسبندگی و پیوستگی در حالت خشک در سنگ آهک کاهش و در حالت تر افزایش می یابد. نتایج آزمایش PULL OFF حاکی از اهمیت جوانسازها در بهبود چسبندگی سنگدانه‌ها و پیوستگی مخلوط‌ها به سطح جاده است. همچنین نتایج اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که قیر اصلاح شده با جوانساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است. نمونه‌ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه‌های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش اب جوشان نتیجه دادند.

واژه‌های کلیدی مخلوط آسفالتی بازیافتی، درصد تراشه، خرابی رطوبتی، مواد جوانساز.

Improving the Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures Against Moisture Damage Using Rejuvenators

Hamidreza Eftekhari   Paraham Hayati   Ali Moniri

Abstract *In this study, the effect of recycled asphalt chips, their percentage of use, and oil-based rejuvenators on the moisture deterioration properties of asphalt mixtures was investigated. The bitumen used in this study was PG 64-16. In order to determine the moisture deterioration parameters, surface water energy tests on bitumen, boiling water test (along with image processing to analyze the extent of deterioration) and PULL OFF were performed on mixtures containing recycled asphalt chips. The results showed that changes in the composition of chips and the addition of rejuvenators have a significant effect on the resistance of mixtures to moisture deterioration. Also, asphalt mixtures containing limestone have higher adhesion and cohesion values with the base bitumen in both dry and wet conditions. However, with the addition of rejuvenator, the adhesion and cohesion strength in the dry state of limestone decreases and increases in the wet state. The results of the PULL OFF test indicate the importance of rejuvenators in improving the adhesion of aggregates and the cohesion of mixtures to the road surface. Also, the results of measuring the surface free energy components of the bitumens used in this study showed that the bitumen modified with a rejuvenator has a higher total surface free energy compared to the base bitumen.*

Key Words Recycled asphalt mixture, Chip percentage, Moisture damage, Rejuvenating materials, Indirect tensile strength resistance

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۰/۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۲/۲۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

Email: p.hayati@modares.ac.ir

(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

مقدمه

مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تکنولوژی بازیافت آسفالت قبل از تخریب کامل لایه‌های آسفالتی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد [1]. اگرچه استفاده گسترده از مواد بازیافتی (RAP) در تولید مخلوط‌های آسفالتی به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی چشمگیری منجر شده است، اما مهم‌ترین چالش در استفاده از مخلوط‌های آسفالتی با درصد بالای RAP، فرسودگی قیر موجود در RAP است که به علت اکسیداسیون قیر و گذشت زمان، سفتی آن را افزایش داده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن را تغییر می‌دهد و کارایی آن را کاهش می‌دهد [2]. کارایی ناکافی مخلوط‌های آسفالتی با تراکم مناسب در محل را متوقف کرده و در نهایت می‌تواند منجر به تشکیل ترک‌های ریز و زودرس شکست در سطح روسازی ایجاد شده در مکان گردد.

بسیاری از پژوهشگران معتقدند که با توجه به ساختار لایه‌ای قیر در تراشه‌های آسفالت، قیر همیشه به تراشه‌ها چسبیده و سنگدانه‌هایی با رنگ تیره ایجاد می‌کند. این قیر هرگز از سنگدانه‌ها جدا نمی‌شود و باعث جلوگیری از ورود آب به سنگدانه‌های تراشه آسفالت می‌شود و در نتیجه تراشه‌ها مشکلی در مورد حساسیت به رطوبت نخواهند داشت. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که این موضوع، یعنی مواد خرده آسفالتی مانند سنگدانه‌های تیره در ترکیب با قیر جدید عمل نمی‌کنند، تا حدی صحیح است و نوع مواد سنگی می‌تواند تأثیرگذار باشد [3]. این موضوع تا به امروز به طور دقیق مورد بررسی قرار نگرفته و تأثیر ارتباط میان میزان عریان شدگی قبل از بازیافت آسفالت و میزان عریان شدگی پس از بازیافت آسفالت مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی این مسئله می‌تواند باعث شود که متخصصان راهسازی و افراد فعال در صنعت بازیافت آسفالت در طراحی ترکیبات آسفالت بازیافتی در مورد موضوعاتی مانند عریان شدگی و حساسیت به رطوبت حساس‌تر عمل کنند و این موضوع را در نظر بگیرند [4,5]. از همین رو در مطالعه حاضر، ضمن بررسی تاثیر جنس تراشه های آسفالت مختلف، به بررسی تأثیر وجود خرابی رطوبتی در تراشه آسفالت بر حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی بازیافتی و همچنین تاثیر استفاده از انواع مواد جوانساز مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی بر حساسیت روطوبتی این مخلوط ها پرداخته می شود.

مطالعات پیشین

مطالعات مختلف بر روی عملکرد مخلوط های آسفالتی بازیافتی انجام شده است. در بسیاری از این مطالعات تاثیر تراشه های به کار رفته در مخلوط های آسفالتی بازبافتی تنها مورد بررسی قرار گرفت و در شماری دیگر علاوه بر این موضوع به تاثیر استفاده از انواع جوانساز ها نیز پرداخته شد.

قابچی و همکارانش [6] در سال ۲۰۱۴ به بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی با درصدهای مختلف تراشه آسفالت با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که نرخ انرژی با استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی افزایش پیدا می‌کند و ازنظر انرژی آزاد سطحی، با افزایش درصد تراشه حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی کم می‌شود. همچنین میزان تأثیر تراشه آسفالت زمانی که سنگ‌دانه‌های جدید از انواع مختلف استفاده می‌شوند متفاوت هستند. به‌عنوان‌مثال تأثیر مثبت تراشه آسفالت بر نرخ انرژی در سنگدانه های آهکی بسیار بیشتر از گرانیتی هستند. ایازی و همکارانش [7] در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی و افزایش درصد تراشه آسفالت موجب بهبود مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی خواهد شد. آن‌ها نشان دادند که با افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی تا ۷۰ درصد، پارامتر TSR تا میزان ۲۰ درصد افزایش پیدا می‌کند و به ۱۰۰ درصد می‌رسد. علت این موضوع عمدتا ساختار لایه‌ای قیر در تراشه-های آسفالتی عنوان‌شده است. درواقع این‌طور بیان‌شده است که یک‌لایه قیر همیشه اطراف تراشه‌های آسفالت چسبیده است باعث می‌شود تا برخورد رطوبت با مصالح سنگی در این مخلوط‌های کم‌تر اتفاق می‌افتد و لذا حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها بهبود پیدا می‌کند. منیری و همکارانش در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالت تا میزان ۱۰۰ درصد باعث می‌شود تا مقاومت این مخلوط‌ها در برابر رطوبت افزایش پیدا کند. در این تحقیق هم علت این موضوع ساختار لایه‌ای قیر در این مخلوط‌ها عنوان‌شده است [8].

علی‌رغم این‌که بسیاری از مطالعات حاکی از تأثیر مثبت استفاده از تراشه آسفالت در مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی بوده است، برخی مطالعات وجود دارد که نشان‌دهنده تأثیر مفنی استفاده از خرده آسفالت بازیافتی بر

حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. فخری و احمدی [9] در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با افزایش سیکل یخبندان و ذوب با طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی هم یخبندان و ذوب تأثیر منفی بر عملکرد مخلوط دارد. آن‌ها همچنین بیان کردند که شیب کاهش پارامتر مقاومت ترک‌خوردگی در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت و مخلوط‌های متداول با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند. ترن (Tran) و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت بدون استفاده از جوانساز کاهش پیدا می‌کند. بااین‌وجود پس از استفاده از جوانساز این مقاومت مجددا بازیابی می‌شود. مطالعات ترن نشان داده است که استفاده از تراشه آسفالت تأثیر منفی در مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت دارند. سینگ (Singh) و همکارانش در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقی به بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی مختلف در برابر رطوبت پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش درصد تراشه آسفالت تا ۳۰ درصد باعث بهبود حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و پس‌ازآن درصورتی‌که درصد تراشه آسفالت تا ۴۰ درصد افزایش پیدا کند مقاومت این مخلوط‌ها در برابر رطوبت کاهش می‌یابد [11].

یان (Yan) و همکارانش [12] در سال ۲۰۲۲ از روش انرژی سطحی برای بررسی چسبندگی روغن‌سوخته خوراکی بازیافتی به‌عنوان جوانساز استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از روغن بازیافتی موجب افزایش نرخ انرژی و بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی در برابر عریان شدگی می‌شود. فنگ (Fang) و همکارانش [13] در سال ۲۰۲۱ در مطالعه‌ای موردی به بررسی تأثیر جوانسازهای مختلف بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که روغن کلزا، روغن‌های گیاهی و روغن تال تأثیر مثبت بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها دارند. بااین‌وجود روغن کرچک و روغن سوخته خوراکی باعث کاهش مقاومت در برابر رطوبت می‌شود. شیه (Xie) و همکارانش [14] در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که استفاده از ۲۵ درصد تراشه آسفالت بازیافتی با دو جوانساز مختلف می‌تواند تا حد زیادی پارامتر مقاومت کششی غیرمستقیم را کاهش دهد. زهور (Zahoor) و همکارانش [15] در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که عدد اسیدی در جوانسازهای بازیافتی تأثیر بسزایی در حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی دارند. حق‌شناس و همکارانش هم در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که خصوصیات شیمیایی جوانسازها تأثیر بسزایی در حساسیت رطوبتی آن‌ها دارد [16].

مطالعات زیادی در مورد تأثیر جوان‌سازی‌های مختلف بر مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالت ترکیب‌شده با مصالح RAP وجود دارد [17-21]. با توجه به این واقعیت که جوانساز ها باعث کاهش سفتی قیر پیر شده‌ی مصالح RAP شده باعث کاهش قابل‌توجه مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. جیا و هوانگ با آماده‌سازی مخلوط‌هایی با سه درصد RAP (۰، ۲۵، ۴۰ درصد) و ترکیب با ۳ درصد جوانساز از نوع روغن ضایعاتی (۰،۲،۵ درصد) مقاومت در برابر شیار شدگی را با استفاده از آزمایش APA ارزیابی کرده و مشاهده کرد که جوانسازها تأثیر منفی بر مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی دارد [22]. کارکی و همکارانش با استفاده از آزمایش ویل تراک، مقاومت در برابر شیار شدگی سه نوع مخلوط نیمه گرم شده و درصدهای مختلف از جوانساز (۰و ۲، ۵، ۱۰) مورد ارزیابی قراردادند و نشان دادند که مخلوط‌های دارای جوانساز دارای عمق شیار شدگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های بدون جوانساز می‌باشد [23]. آرامبولا و کاسر، تأثیر جوانساز از نوع روغن‌های چوب را بر شیار شدگی مخلوط‌های پیر شده‌ی کوتاه‌مدت (دو ساعت در دمای ۱۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) با دو نوع مصالح سنگی (آهکی و ماسه‌ای) مورد ارزیابی قراردادند. آن‌ها دریافتند که مخلوط حاوی ۱۲/۵ درصد جوانساز روغن چوب نمی‌تواند معیار مقاومت در برابر شیار شدگی (کمتر از ۱۲/۵ میلی‌متر) را عبور کند [24].

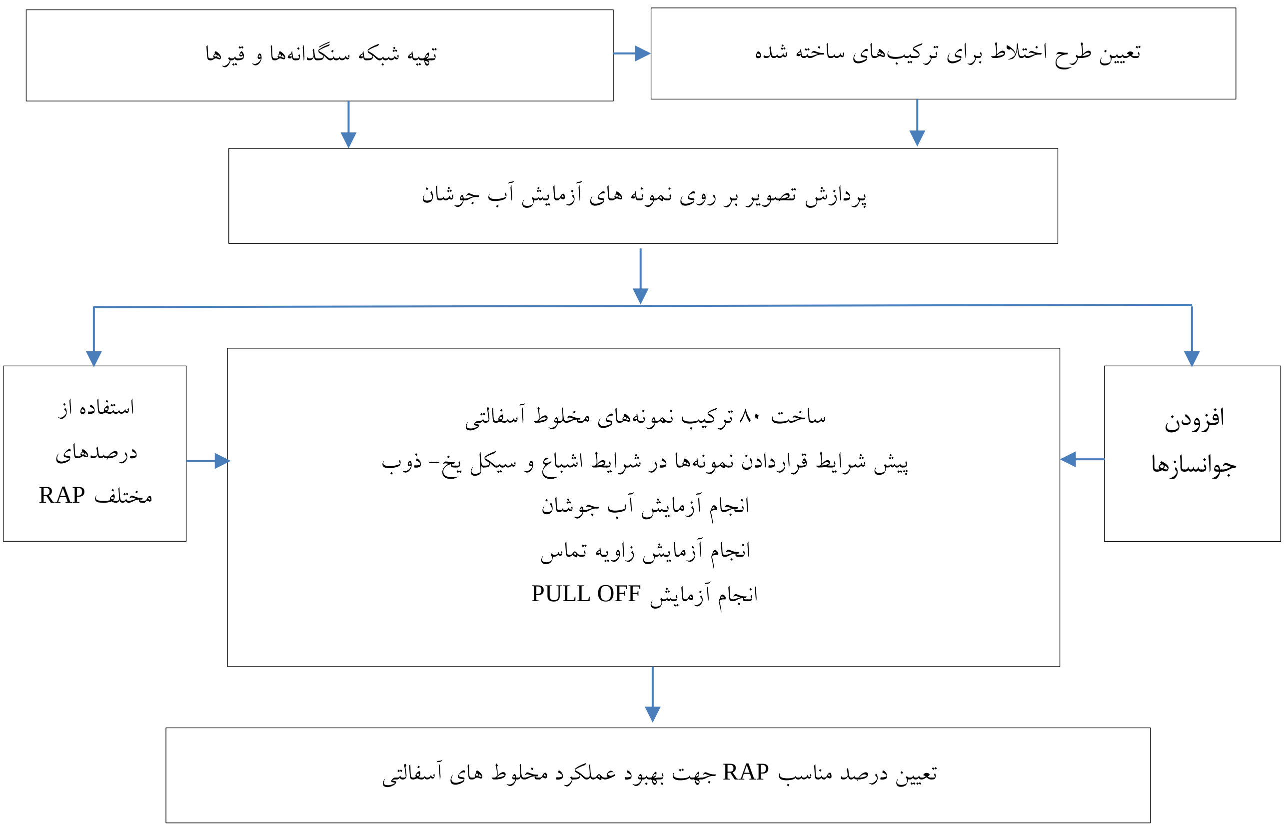
روش تحقیق

در این پژوهش از چهار درصد RAP با درصدهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و سه نوع جوانساز از گروه‌های مختلف انواع جوانساز ها استفاده گردید. سپس برای تعیین درصد بهینه‌ی

جوانساز ها، قیرپیرشده ی مخلوط‌های بازیافتی (RAP) استخراج گردیده و سپس با استفاده از آزمایش‌های متداول قیر(درجه‌ی نفوذ و نقطه ی نرمی) درصد بهینه‌ی هریک از جوانساز ها تعیین گردید. با ارزیابی میزان اثرگذاری ساختار مصالح طرح بر روی ویژگی‌های حجمی مخلوط‌های آسفالتی، از بین دانه‌بندی‌های مختلف ساختار و دانه‌بندی که پاسخگوی نیازهای طرح اختلاط و سیستم روسازی باشد انتخاب گردید. با انتخاب دانه‌بندی مصالح طرح، نمونه‌های آسفالتی به‌منظور تعیین درصد بهینه‌ی حالت‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی، با استفاده از الزامات و استانداردهای طرح اختلاط مارشال تهیه گردید. سپس به ازای درصدهای قیر بهینه‌ی به‌دست‌آمده نمونه‌ها در ابعاد مشخص طبق استاندارد هر نوع آزمایش با استفاده از متراکم کننده‌ی برقی چکش مارشال تهیه گردیده و نمونه‌های ساخته‌شده تحت بارگذاری دستگاه‌های موردنظر برای ارزیابی خواص مکانیکی قرار گرفتند.در مطالعه حاضر به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی از دو آزمایش آب جوشان و آزمایش PULL OFF و همچنین به منظور بررسی مشخصات قیر، از آزمایش انرژی آزاد سطحی قیر استفاده شد. شکل (۱)، قلوچارت مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

مصالح مصرفی

در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از مصالح مختلفی از قبیل: خرده مصالح آسفالتی، قیر، مصالح سنگی و جوانساز استفاده‌شده که در ادامه به تفکیک ارائه‌شده است.



شکل ۱ مراحل روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش

مصالح سنگی

کانی های تشکیل دهنده مصالح سنگی مورداستفاده در جدول (۱) نشان داده‌شده است. همانطور که مشاهده می‌شود که سنگدانه برداشت شده از آسفالت راه های شهری استان مازندران از نوع آهکی می باشد. با بررسی سایر سنگدانه ها مشخص شد که سنگدانه های استان گلستان از نوع گرانیتی می‌باشد. سنگدانه های دو بزرگراه همت و بابایی نیز از نوع گرانیتی می‌باشد.

دانه‌بندی مصالح سنگی تراشه‌ی آسفالت (RAP)

دانه‌بندی چهار نمونه از مصالح سنگی تراشه‌ی آسفالت پس از جداسازی قیر پیر شده در جدول (۲) ارائه‌شده است. نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی تراشه‌ی آسفالت نشان می‌دهد که دانه‌بندی موردنظر در محدوده‌ی دانه‌بندی شماره‌ی ۴ آیین‌نامه واقع‌شده است.

قیر

درصـد قیر آسـفالت بازیافتی طبق اسـتاندارد ASTM D2172 [25] و روش اکسترکشن تعیین گردید. قیر مصرفی مورداستفاده در این راه‌ها، قیر PG 64-16 می‌باشد. نوع قیر و خصوصیات آن در جدول (۳) نشان داده‌شده است.

جوانساز

در این پژوهش به‌منظور بازگرداندن خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده‌ی موجود در آسفالت بازیافتی از سه نوع جوانساز و عامل بازیافتی روغن آفتابگردان، آروماتیک (سایکول وژن cyclogen) و نفتیک (وکیوم باتوم) استفاده شده است. جدول (۴) مشخصات جوانسازهای مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۱ کانی های تشکیل دهنده سنگدانه های تراشه آسفالت

ردیف	معبر	Sio2	Al2o3	Fe2o3	Mgo	Cao	Sio2/ Cao
۱	گلستان	۶۶/۸۴	۱۳/۵۲	۴/۰۵	۱/۷۲	۱۳/۴۷	۴/۹۶
۲	مازندارن	۱۶/۴۷	۴/۷۸	۳/۸۲	۲/۲۲	۷۲/۳۴	۰/۲۸
۳	بزرگراه بابایی	۵۲/۱۹	۶/۰۴	۷/۰۷	۲/۸۸	۳۱/۷۱	۱/۶۵
۴	بزرگراه همت	۵۰/۱۰	۵/۹۱	۶/۹۳	۲/۸۰	۳۰/۴۵	۱/۶۴

جدول ۲ درصد عبوری مصالح سنگی تراشه آسفالت پس از جداسازی قیر

اندازه الک	درصد عبوری (دانه‌بندی شماره‌ی ۴ نشریه‌ی ۲۳۴)	درصد عبوری نمونه‌ی				
		۱	۲	۳	۴	متوسط
۱۹میلی‌متر (۳/۴ اینچ)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ)	۹۰-۱۰۰	۹۸/۲	۹۹/۵	۹۸/۹	۹۹	۹۸/۹
۹/۵ میلی‌متر (۳/۸ اینچ)	---	۹۳/۳	۹۵/۳	۹۵/۵	۹۵/۴	۹۴/۹
۴/۷۵ میلی‌متر (شماره‌ی ۴)	۴۴-۷۴	۵۰/۶	۵۸/۸	۶۲/۴	۶۴/۸	۵۹/۲
۲/۳۶ میلی‌متر (شماره‌ی ۸)	۲۸-۵۸	۲۹/۵	۳۸/۲	۴۱/۶	۴۳/۷	۳۸/۳
۱/۱۸ میلی‌متر (شماره‌ی ۱۶)	---	۲۴/۵	۲۴/۰	۲۳/۰	۲۴/۵	۲۴/۰
۰/۶ میلی‌متر (شماره‌ی ۳۰)	---	۱۸/۰	۱۸/۵	۱۹/۵	۱۸/۰	۱۸/۵
۰/۳ میلی‌متر (شماره‌ی ۵۰)	۵-۲۱	۱۰/۵	۱۱/۶	۱۱/۰	۱۴/۶	۱۱/۹
۰/۷۵۰ میلی‌متر (شماره‌ی ۲۰۰)	۲-۱۰	۵/۹	۶/۵	۴/۶	۹/۲	۶/۶

جدول ۳ مشخصات قیر بازیافتی از تراشه آسفالت

نوع آزمایش	روش استاندارد	G-G	M-B	T-B	T-H
درصد قیر(درصد)	ASTM D2172	۴/۴۷	۵/۵۸	۵/۰۲	۴/۷۹
درجه نفوذ در دما ۲۵ درجه سانتیگراد (۰/۱ میلیمتر)	ASTM D5	۳۱	۲۹	۲۵	۲۲
نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	ASTM D36	۵۶/۴	۵۷/۷	۵۹/۶	۶۱/۳
ویسکوزیته در دما ۱۳۵ درجه سانتیگراد (پاسکال ثانیه)	ASTM 4402	۰/۸۱۱	۰/۷۹۱	۰/۷۸۲	۰/۷۶۱

جدول ۴ مشخصات جوانسازهای مورد استفاده

نوع آزمایش	روش استاندارد	گیاهی (روغن آفتابگردان)	آروماتیک (سایکولوژن cyclogen)	نفتیک (وکیوم باتوم)
پایه	*	گیاهی	نفتی	نفتی
رنگ	*	زرد	زرد	سیاه
بو	*	ندارد	ندارد	ندارد
حلالیت در آب	*	ندارد	ندارد	ندارد
وزن مخصوص در دما ۲۵ درجه سانتیگراد (گرم بر سانتیمتر مکعب)	ASTM D70	۰/۹۸۱	۰/۹۷۲	۱/۰۳۲
درجه اشتعال(درجه سانتیگراد)	ASTM D92	۳۱۵	۲۱۹	۲۸۱
کندروانی کینماتیکی در دما ۱۰۰ درجه سانتیگراد (استوکس)	ASTM D2170	۳۱	۱۱	۱۳
لعاب نازک قیر افت حرارتی (درصد)	ASTM D1754	۲/۱	۱/۶	۲/۷

آزمایش های انجام شده

آزمایش آب جوشان

آزمایش آب جوشان (Boiling Water Test)، یک آزمایش ساده برای ارزیابی حساسیت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت است که با توجه به استاندارد ASTMD3625 انجام می‌گیرد [27]. براساس این استاندارد در حدود ۲۵۰ گرم از نمونه‌های غیرمتراکم از مخلوط‌های آسفالتی به آب جوشان اضافه می‌شوند و در حدود ۱۰ دقیقه در همین شرایط قرار داده می‌شوند، سپس نمونه‌ها را به دمای محیط آورده تا خنک شوند. بعد از خنک و خشک شدن نمونه‌ها، آن‌هارا بر روی کاغذ سفید رنگ ریخته و جهت پردازش تصویر، از آن‌ها عکسبرداری می‌شود. کاهش سطح پوشش قیری بعد از آزمایش آب جوشان به عنوان شاخص خرابی رطوبتی ارزیابی می‌شود [28].

آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن (Pull off)

در این تحقیق، آزمایش off-Pull نیز استفاده شده است. در این آزمایش، نمونه‌های قیری تحت شرایط کشش مستقیم برای اندازه‌گیری مقدار چسبندگی قیر به سنگدانه و اندازه‌گیری پیوستگی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راستا، از دستگاه A-AT test Poseاستفاده شد. همچنین، استاندارد AASHTO TP–91 (2015) و (ASTM D4541(2017 برای آماده-سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش استفاده گردید. نمونه‌ها تحت شرایط چند سیکل ذوب و انجماد قرار گرفتند. در آزمایش-off Pull، استاب هایی استفاده می‌گردد که قیر از یک سو به انتهای استاب میچسبد و از طرف دیگر به سطح سنگدانه می‌چسبد. در ادامه، نرخ کشش برای اندازه‌گیری مقدار مقاومت چسبندگی در دستگاه تنظیم می‌شود و فک دستگاه روی استاب قرار میگیرد. سپس، نمونه بدون اعمال پیچش و با استفاده از نیروی کششی، تحت تنش قرار می‌گیرد تا گسیختگی صورت پذیرد. نرخ افزایش نیرو باید طوری تنظیم شود که یک حرکت پیوسته ایجاد گردد و گسیختگی در مدت کمتر از ۱۰۰ ثانیه رخ دهد. این نرخ باید کمتر از یک مگاپاسکال بر ثانیه باشد [29]. نرخ افزایش نیرو در این تحقیق ۰/۶۶ مگاپاسکال بر ثانیه بود. عدد مقاومت چسبندگی در آزمایشoff-Pull ، حداکثر تنشی است که نمونه تا لحظه گسیختگی تحمل می‌کند.

در این پژوهش، آزمایش off-Pull مطابق شکل (۲) در دو حالت خشک و تر و با ضخامت کم و زیاد قیر انجام شده است. ضخامت زیاد قیر، معادل با گسیختگی در غشای قیر یا گسیختگی

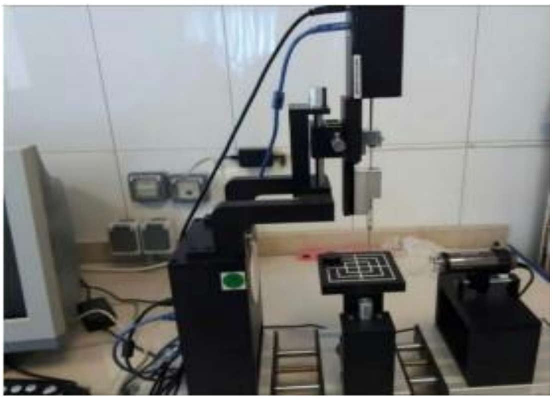
پیوستگی و حالت ضخامت کم قیر، معادل با گسیختگی سطح تماس قیر– سنگدانه یا گسیختگی چسبندگی است.



شکل ۲ قرارگیری نمونه ها در آزمایش PULL OFF

آزمایش زاویه تماس(Sessile Drop)

برای اندازه گیری زاویه تماس دو روش وجود دارد: در روش غیر مستقیم زاویه تماس با اندازه گیری نیرو (مانند روش) Wilhelmy به دست می آید. در روش های مستقیم زاویه تماس از روی تصویر (مثل روش Sessile Drop) اندازه گیری می شود. از بین این روش ها، روش های مستقیم به علت دقت بالاتر و نیاز به حجم کمتری از مایع، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند .روش هایSessile Drop و صفحه شیب دار دو روش اصلی برای اندازه گیری زاویه تماس دینامیک هستند. در روش Sessile Drop (شکل ۳) ا بتدا قطره روی یک نمونه افقی تزریق می شود، تزریق ادامه پیدا می کند و زاویه تماس حین حرکت خط تماس اندازه گیری می شود (زاویه تماس پیشروی) .عکس این حرکت برای اندازه گیری زاویه تماس پسروی انجام می شود .برای یک سطح صاف همگن، انرژی آزاد سطح با نوشتن معادله حالت از طریق روش Sessile Drop به دست می آید. در روش صفحه شیب دار، وقتی قطره روی سطح قرار گرفت نگه دارنده نمونه را (همراه نمونه) کج می کنیم. به محض اینکه قطره شروع به لغزش روی سطح کرد زاویه پیشروی و زاویه پسروی را ثبت می کنیم [26].



شکل ۳ دستگاه اندازه گیری زاویه تماس

اندازه گیری مؤلفه های انرژی آزاد سطحی با استفاده از روش قطره چسبیده یکی از روشهای متداولی است که امروزه برای مواد جامد مورد استفاده قرار میگیرد. این روش را هم می توان برای سنگدانه و هم برای قیر (به صورت جامد) مورد استفاده قرار داد، به شرطی که مؤلفه های انرژی آزاد سطحی سنگدانه کوچک باشد. سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش دارای مؤلفه های انرژی آزاد سطحی بزرگ هستند که این روش برای اندازه گیری اجزای انرژی آزاد سطحی آنها مناسب نیست.

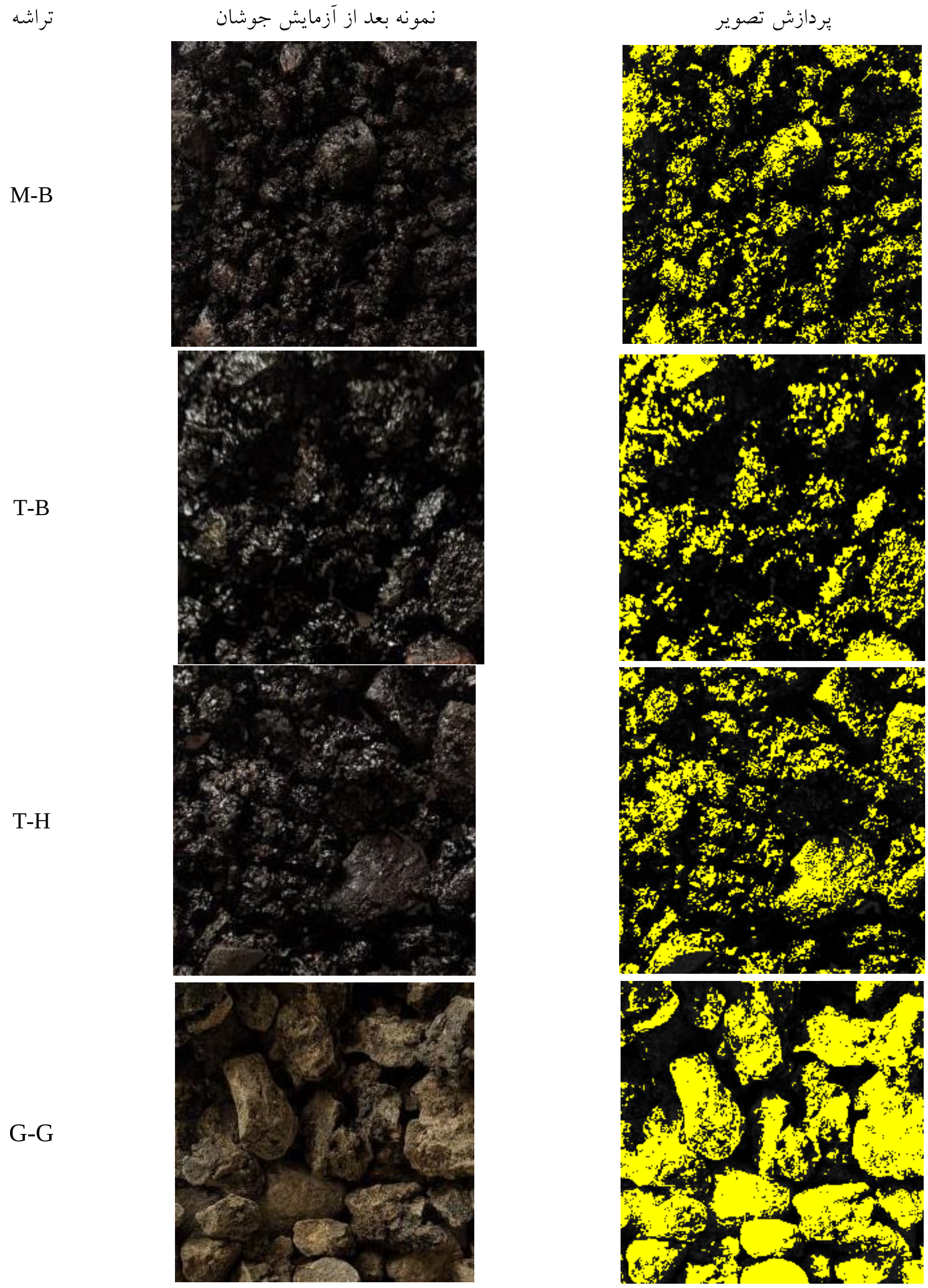
نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایشات مختلف بر روی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی حاوی درصدهای متفاوت تراشه-های مختلف از راه‌های شهری در دو استان مازندران و گلستان و بزرگراه‌های همت و بابایی و سه جوانساز روغن آفتابگردان، سایکلوژن و وکیوم باتوم ارایه می‌شود.

آزمایش آب جوشان

نتایج بدست آمده از پردازش تصویر (Image Processing) نمونه‌های آسفالتی غیرمتراکم بعد از آزمایش آب جوشان در شکل (۴) نشان داده شده است. تصاویر نشان می‌دهند که نقاط زرد رنگ در نمونه‌های آسفالتی با تراشه راه‌های استان مازندران

نسبت به نمونه‌های استان گلستان و بزرگراه‌های همت و بابایی کمتر می‌باشد. همچنین در جدول (۴) درصد مقدار پوشش (coating) قیری بر روی سطح سنگدانه‌ها ارایه شده است که با مقایسه تصاویر شکل (۴) و نتایج این جدول می‌توان بیان کرد که هر چه درصد کانی CaO در تراشه‌ها بیشتر باشد، مخلوط‌های آسفالتی مقاومت بیشتری در برابر رطوبت دارد. علاوه بر این با مقایسه تراشه‌های استان گلستان و بزرگراه‌های همت و بابایی، می‌توان پی برد که هر چه مقادیر SiO2 کمتر باشد، مقاومت در برابر خرابی رطوبتی بیشتر می‌باشد [27]. همانطور که از نتایج جدول (۵) مشخص است؛ نمونه‌ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه‌های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش اب جوشان نتیجه دادند.



شکل ۴ پردازش تصویر نمونه‌ها بعد از آزمایش آب جوشان

جدول ۵ نتایج پردازش تصویر سنگدانه‌ها بعد از آزمایش آب جوشان

نوع تراشه	درصد سطح پوشش سنگدانه‌ها	شاخص تحلیل تصویری پوشش	ماهیت مصالح (XRD)
M-B	۸۰/۶۱۸	زیاد	آهکی
G-G	۵۱/۳۴۰	کم	سیلیسی
T-H	۷۶/۵۰۴	متوسط	ترکیبی
T-B	۷۹/۳۱۱	متوسط	ترکیبی

آزمایش PULL OFF

در جداول (۶) و (۷) به ترتیب نتایج مقاومت چسبندگی و مقاومت پیوستگی پول آف ترکیبات ساخته شده در شرایط خشک و مرطوب ارائه شده است. دمای انجام آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد است. نرخ بارگذاری که یک پارامتر مهم درآزمایش‌های ارزیابی مقاومت کششی میباشد، ثابت فرض شده است. نرخ بارگذاری ۰/۷ مگاپاسکال بر ثانیه است. در این راستا، از دستگاه A-AT test Poseاستفاده شد. همچنین، استاندارد ۹۱– AASHTO TP (2015) و (ASTM D4541(2017 برای آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش استفاده گردید. نمونه ها تحت شرایط چند سیکل ذوب و انجماد قرار گرفتند. در آزمایش-off Pull، استاب هایی استفاده میگردد که قیر از یک سو به انتهای استاب میچسبد و از طرف دیگر به سطح سنگدانه میچسبد. در ادامه، نرخ کشش برای اندازه گیری مقدار مقاومت چسبندگی در دستگاه تنظیم میشود و فک دستگاه روی استاب قرار میگیرد. سپس، نمونه بدون اعمال پیچش و با استفاده از نیروی کششی، تحت تنش قرار میگیرد تا گسیختگی صورت پذیرد. نرخ افزایش نیرو باید طوری تنظیم شود که یک حرکت پیوسته ایجاد گردد و گسیختگی در مدت کمتر از ۱۰۰ ثانیه رخ دهد. این نرخ باید کمتر از یک مگاپاسکال بر ثانیه باشد) ASTM D۴۵۴۱، ۲۰۱۷ .(نرخ افزایش نیرو در این تحقیق ۰/۶۶ مگاپاسکال بر ثانیه بود. عدد مقاومت چسبندگی در آزمایشoff-Pull، حداکثر تنشی است که نمونه تا لحظه گسیختگی تحمل میکند.

همان طور که از نتایج پیداست سنگ آهک در هر دو شرایط خشک و تر و در هر چهار نوع سنگدانه دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری با قیر پایه می باشد. اما با اضافه شدن جوانساز مقاومت چسبندگی و پیوستگی در حالت خشک در سنگ آهک کاهش و در حالت تر افزایش می یابد. همچنین مقادیر مقاومت چسبندگی و پیوستگی نمونه‌های اصلاح شده با انواع جوانساز دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری می‌باشد. علاوه بر این، در بین مواد جوانساز، نمونه های اصلاح سده با سایکلوژن دارای بیشترین مقدار چسبندگی و پیوستگی می‌باشد [30]. بنابراین می توان بیان کرد که افزودن جوانسازها به قیرهای بازیافتی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر افزایش چسبندگی داشته باشد. مقادیر مقاومت چسبندگی و پیوستگی برای هر نمونه به صورت دقیق اندازه‌گیری و ثبت شد و تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که استفاده از تراشه‌های بازیافتی با درصدهای مختلف و جوانسازهای متفاوت، می‌تواند به بهبود عملکرد آسفالت در برابر نیروهای کششی کمک کند.

جدول ۶ مقاومت چسبندگی (کیلو پاسکال) در آزمایش چسبندگی PULL OFF

حالت	مصالح سنگی	قیر PG 64-10	قیر با جوانساز گیاهی	قیر با سایکلوژن	قیر با وکیوم باتوم
خشک	M-B	۲/۸	۳/۰	۳/۸	۳/۶
	T-H	۲/۵	۳/۲	۳/۸	۳/۵
	T-B	۲/۴	۳/۲	۳/۸	۳/۵
	G-G	۲/۳	۳/۳	۳/۸	۳/۵
تر	M-B	۲/۰	۲/۷	۳/۵	۳/۳
	T-H	۱/۶	۲/۶	۳/۲	۳/۱
	T-B	۱/۵	۲/۶	۳/۲	۳/۰
	G-G	۱/۴	۲/۵	۳/۱	۲/۹

جدول ۷ مقاومت پیوستگی (کیلو پاسکال) در آزمایش چسبندگی PULL OFF

حالت	مصالح سنگی	قیر PG 64-10	قیر با جوانساز گیاهی	قیر با سایکلوژن	قیر با وکیوم باتوم
خشک	M-B	۴/۰	۴/۵	۴/۹	۴/۷
	T-H	۳/۹	۴/۶	۵/۰	۴/۸
	T-B	۳/۹	۴/۷	۵/۱	۴/۸
	G-G	۳/۸	۴/۸	۵/۲	۵/۰
تر	M-B	۳/۲	۳/۸	۴/۵	۴/۳
	T-H	۲/۸	۳/۶	۴/۲	۴/۲
	T-B	۲/۶	۳/۵	۴/۰	۴/۱
	G-G	۲/۴	۳/۴	۳/۸	۴/۰

انرژی آزاد سطحی قیر

برای اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیر در روش قطره چسبنده، ابتدا باید زاویه تماس سه مایع آزمایش با قیر مورد نظر اندازه گیری شود. برای اینکه بتوان مولفه های انرژی آزاد سطحی قیر را از روی زوایای تماس با مایع های آزمایش تعیین کرد، باید از مایع هایی استفاده نمود که مولفه های انرژی آزاد سطحی آن ها معلوم باشد. معموال برای اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی با روش زاویه تماس از یک ماده قطبی، یک ماده غیرقطبی و یک ماده نیمه قطبی استفاده میشود که این مواد در این پژوهش به ترتیب آب، دی یدومتان و اتیلن گلیکول بوده اند. مولفه های انرژی آزاد سطحی مایع های آزمایش مورد نظر در این پژوهش در جدول (۸) ارائه شده است.

پوشش دهی یکی از توانایی های مایع ها در تماس با سطح جامد میباشد که با زاویه تماس ارتباط دارد. این پارامتر در نتیجه تماس دو ماده که در کنار یکدیگر قرارگرفته اند، اندازه گیری می شود. اگرچه این مفهوم معنای متفاوتی با چسبندگی دارد اما براساس نظر بعضی پژوهشگران میتواند شرایط الزم برای ایجاد چسبندگی مناسب را فراهم کند. هر چه زاویه تماس جسم مایع بر روی سطح جامد کمتر باشد نشان دهنده این است که قابلیت پوشش دهی آن ماده بهتر است. معموال زوایای تماس کمتر از ۹۰ درجه را به عنوان پوشش پذیری خوب و زوایای تماس بزرگتر از ۹۰ درجه را به عنوان پوشش پذیری ضعیف در نظر می‌گیرند. همانطور که از داده های جدول (۹) مشاهده میشود، مایع های آزمایش روی قیراصلاح شده با جوانساز دارای زاویه تماس‌های کوچکتری نسبت به قیر پایه هستند. این رخداد مورد انتظار بود، زیرا جوانسازها سبب کاهش کندروانی و افزایش درجه نفوذ و قابلیت روانی می شوند که این پارامتر میتواند در پوشش پذیری موثر باشد. البته ساختار قیر و نوع مایع مورد استفاده در تعیین پوشش دهی تعیین کننده است.

جدول ۸ مایعات آزمایش به همراه اجزای انرژی آزاد سطحی آنها

مایعات آزمایش	مولفه قطبی Γ^{AB}_{L}	مولفه بازی Γ^{-}_{L}	مولفه اسیدی Γ^{+}_{L}	مولفه غیرقطبی Γ^{LW}_{L}	مولفه کل $\Gamma_{L\ total}$
آب	۵۱/۰	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۱/۸	۷۲/۸
دی یدومتان	۰	۰	۰	۵۰/۸	۵۰/۸
اتیلن گلیکول	۱۹/۱	۳۱/۳	۲/۳۴	۲۹/۰	۴۸/۲۹

جدول ۹ اجزای انرژی آزاد سطحی قیر پایه و اصلاح شده به همراه زوایای تماس آنها با مایعات آزمایش

مشخصات	قیر پایه	قیر + جوانساز R1	قیر + جوانساز R2	قیر + جوانساز R3
زاویه تماس با آب	۱۲۶/۶۷	۱۲۳/۲۰	۱۱۷/۴۰	۱۲۰/۴۴
زاویه تماس با دی یدومتان	۱۱۶/۳۳	۱۱۲/۴۳	۱۰۹/۶۳	۱۱۱/۳۹
زاویه تماس با اتیلن گلیکول	۱۱۳/۷۲	۱۰۹/۷۸	۱۰۵/۵۸	۱۰۷/۶۸
انرژی آزاد سطحی کل(mJ/m^2)	۱۴/۹۴	۲۰/۶۵	۲۶/۱۵	۲۳/۹۴
انرژی آزاد غیرقطبی(mJ/m^2)	۱۳/۲۳	۱۸/۷۸	۲۳/۷۸	۲۰/۵۳
انرژی آزاد قطبی(mJ/m^2)	۲/۱۱	۲/۱۷	۲/۶۷	۲/۴۴
مولفه اسیدی انرژی آزاد سطحی(mJ/m^2)	۲/۲۵	۱/۹۵	۱/۸۲	۱/۹۰
مولفه بازی انرژی آزاد سطحی(mJ/m^2)	۰/۴۳	۰/۶۴	۰/۹۴	۰/۷۸

انرژی آزاد کل پارامتری با تاثیر دوگانه به شمار می آید زیرا افزایش آن سبب بهبود مقاومت در برابر خرابی خستگی از نوع پیوستگی شده که یک اثر مثبت در کاهش گسیختگی پیوستگی به شمار میآید و از طرفی باعث کاهش در پوشش پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه می‌شود که برای ایجاد چسبندگی مناسب بین قیر–سنگدانه نامطلوب است. زیرا افزایش در پوشش پذیری سبب میشود تا سطح تماس بیشتری از سنگدانه توسط قیر پوشش داده شود که می‌تواند به موثربودن چسبندگی مناسب بین قیر و سنگدانه کمک کند. نتایج اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان میدهد که قیر اصلاح شده با جوانساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است که باعث میشود تا این قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر پایه تجربه کند .همانطور که از داده های ارائه شده در جدول مشخص است، مولفه قطبی قیر در مقایسه با مولفه غیرقطبی آن بسیار کوچک است. حتی دیده شده است، در بعضی از تحقیقات مولفه قطبی قیر برابر با صفر محاسبه شده است. براین اساس میتوان گفت قیر یک ماده با خصوصیات قطبی ضعیف است که پیوند آن با سایر مواد نیز عمدتا از طریق مولفه غیرقطبی و پیوندهای کووالانسی می باشد. اندازه‌گیری‌های انرژی آزاد سطحی قیر از نمونه‌های مختلف نشان دهنده تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای بود. قیرهای اصلاح شده با جوانساز نشان دادند که دارای انرژی آزاد سطحی بالاتری هستند که این امر می‌تواند به معنای بهبود خواص چسبندگی و کاهش احتمال گسیختگی در بین سنگدانه‌ها باشد. مقایسه نتایج با داده‌های موجود در ادبیات نشان داد که افزایش درصد جوانساز به طور مؤثری بر افزایش پایداری و کارایی آسفالت تأثیر می‌گذارد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۲۳، که بر روی اثرات مختلف مواد جوانساز بر روی خصوصیات مکانیکی و دوام آسفالت تمرکز داشت، مشخص شد که استفاده از جوانسازهای بر پایه روغن‌های گیاهی می‌تواند به طور مؤثری مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و خستگی را بهبود بخشد. این نتایج با یافته‌های مطالعه حاضر که نشان دهنده بهبود عملکرد آسفالت با استفاده از ترکیبات جوانساز و تراشه‌های بازیافتی است، هم‌راستا هستند [1].

در سال ۲۰۲۴، مطالعاتی که بر روی تأثیر تراشه‌های بازیافتی بر خواص فیزیکی و شیمیایی آسفالت تمرکز داشتند، نشان دادند که درصد بالایی از تراشه می‌تواند منجر به کاهش انعطاف‌پذیری و افزایش شکنندگی مخلوط شود. این یافته‌ها تا حدی با نتایج این مطالعه متفاوت است که نشان می‌دهد با استفاده از نسبت‌های مناسب و جوانسازهای انتخابی، می‌توان اثرات منفی ناشی از استفاده بیش از حد تراشه‌ها را کاهش داد [31].

نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر به صورت اختصار در ادامه بیان شده است:

۱. با توجه به نتایج آزمایش آب جوشان و پردازش تصویر نمونه‌های آسفالتی غیرمتراکم، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های آسفالتی با تراشه آهکی نسبت به نمونه‌های گرانیتی دارای نقاط زرد کمتری هستند. به عبارت دیگر ترکیب‌های با مقادیر بیشتر CaO و کمتر SiO2 در تراشه‌ها، موجب افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در مقابل عوامل خرابی رطوبتی می‌شوند.

۲. نمونه‌ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه‌های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش اب جوشان نتیجه دادند.

۳. با بررسی نتایج آزمایش PULL OFF می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از جوانسازها، به ویژه سایکلوژن، در اصلاح سطح سنگ آهک منجر به افزایش قابلیت چسبندگی و پیوستگی می‌شود. این موارد می‌توانند در بهبود عملکرد مصالح سنگی مورد استفاده قرار گیرند.

۴. نتایج اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان میدهد که قیر اصلاح شده با جوانساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است که باعث می‌شود تا این قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر پایه تجربه کند.

واژه نامه

سایکولوژن	Cyclogen
تراشه‌ی آسفالت بازیافتی	RAP
آزمایش کشش چسبندگی	Pull-off Test

سپاسگزاری

مراجع

[1] H. Ziari, B. Mojaradi, S. A. Saadatjoo, A. Amini, V. Najafi Moghaddam Gilani, and S. M. Hosseinian, "Laboratory investigation of reclaimed asphalt mixtures containing cyclogen and vacuum bottom rejuvenators," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2023, no. 1, 2023. https://doi.org/10.1155/2023/6223569

[2] R. Fariman, S. A. Hosseini, and M. Fakhri, "Developing a prediction model for rutting depth of warm mix asphalt mixture using neural network," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 1–16, 2023. (In Persian) https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.74238.1104

[3] H. Nabizadeh, H. F. Haghshenas, Y.-R. Kim, and F. T. S. Aragão, "Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 65–73, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.101

[4] T. Mattinzioli, F. Moreno, M. Rubio, and G. Martínez, "LCA and cost comparative analysis of half-warm mix asphalts with varying degrees of RAP," in *Pavement, Roadway, Bridg. Life Cycle Assess*. 2020, Proceedings of the International Symposium on Pavement. Roadway, Bridg. Life Cycle Assess. 2020, Sacramento, CA, Jun. 2020, CRC Press, 2020, p. 354.

[5] A. Sarhangi, F. Omidinasab, and A. Dalvand, "Evaluation of mechanical properties of concrete by replacing natural aggregates with fine and coarse recycled aggregates," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 87–110, 2023. (In Persian) https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.77651.1164

[6] R. Ghabchi, D. Singh, and M. Zaman, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 479–489, 2014. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.042

[7] M. J. Ayazi, A. Moniri, and P. Barghabany, "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives," *Petroleum Science and Technology*, vol. 35, no. 9, pp. 890–895, 2017. https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1290655

[8] A. Moniri et al., "Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22, no. 11, pp. 1423–1434, 2021. https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1696461

[9] M. Fakhri and A. Ahmadi, "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 748–756, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.116

[10] N. H. Tran, A. Taylor, and R. Willis, "Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents," *NCAT report*, no. 1, pp. 12–05, 2012.

[11] D. Singh, S. F. Chitragar, and P. K. Ashish, "Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 1145–1153, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.176

[12] S. Yan, C. Zhou, and J. Ouyang, "Rejuvenation effect of waste cooking oil on the adhesion characteristics of aged asphalt to aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 327, p. 126907, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126907

[13] Y. Fang et al., "Comprehensive review on the application of bio-rejuvenator in the regeneration of waste asphalt materials," *Construction and Building Materials*, vol. 295, p. 123631, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123631

[14] Z. Xie et al., "Performance of asphalt mixtures with high recycled contents using rejuvenators and warm-mix additive: field and lab experiments," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 29, no. 10, p. 04017190, 2017. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002037

[15] F. Zhou, C. Estakhri, and T. Scullion, "Literature review: performance of RAP/RAS mixes and new direction," *Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office*, 2014.

[16] M. Zahoor et al., "Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, p. 123304, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123304

[17] J. Ji, H. Yao, Z. Suo, Z. You, H. Li, S. Xu, and L. Sun, "Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, p. D4016003, 2017. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001769

[18] N. Tran, A. Taylor, P. Turner, C. Holmes, and L. Porot, "Effect of rejuvenator on performance characteristics of high RAP mixture," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, pp. 183–208, 2017. https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1266757

[19] W. S. Mogawer, A. Booshehrian, S. Vahidi, A. J. Austerman, "Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, pp. 193–213, 2013. https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812836

[20] L. Uzarowsk, H. Prilesky, E. Berube, V. Henderson, and R. Rizvi, "Laboratory Testing of Vancouver HMA Mixes Containing Recycled Asphalt Shingles," *Transportation Association of Canada*, Halifax, Nov. Scotia, 2010. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127698

[21] X. Jia, B. Huang, J. A. Moore, and S. Zhao, "Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, p. 4015042, 2015. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001292

[22] S. Im, P. Karki, and F. Zhou, "Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators," *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 727–734, 2016. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.081

[23] H. Taherkhani and F. Noorian, "Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP)," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, pp. 1238–1257, 2020. https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220

[24] Z. H. Al Saffar, H. Yaacob, M. K. Idham, M. K. Saleem, J. A. U. C. Lai, R. Putra Jaya, "A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 48, no. 3, 2020. https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0635

[25] L. Chatergoon, R. Whiting, and C. Smith, "Improved methods for separation and chromatographic analysis of natural

asphalts," *Analyst*, vol. 117, no. 12, pp. 1869–1873, 1992. https://doi.org/10.1039/an9921701869

[26] H. Behbahani, G. H. Hamedi, and V. M. Gilani, "Evaluating the surface free energy and moisture susceptibility of modified asphalt mixtures with nano hydrated lime under saturated conditions with deicer materials and distilled water," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 97, pp. 791–798, 2020.

[27] V. N. M. Gilani, S. M. Hosseinian, H. Behbahani, and G. H. Hamedi, "Prediction and pareto-based multi-objective optimization of moisture and fatigue damages of asphalt mixtures modified with nano hydrated lime," *Construction and Building Materials*, vol. 261, p. 120509, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120509

[28] V. N. M. Gilani, S. M. Hosseinian, D. Safari, and G. H. Hamedi, "Presentation of predictive models for two-objective optimization of moisture and fatigue damages caused by deicers in asphalt mixtures," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 49, no. 6, pp. 4437–4458, 2021. https://doi.org/10.1520/JTE20200448

[29] N. Mukhtar, M. R. M. Hasan, K. A. Shariff, and W. Van Den Bergh, "Relationship between the physicochemical and electrostatic charge characteristics of filler materials on the morphological and adhesive Pull-Off tensile strength of asphalt mastics," *Construction and Building Materials*, vol. 346, p. 128343, 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128343

[30] G. H. Hamedi, M. R. Esmaeeli, V. N. M. Najafi Moghaddam Gilani, and S. M. Hosseinian, "The effect of aggregate-forming minerals on thermodynamic parameters using surface free energy concept and its relationship with the moisture susceptibility of asphalt mixtures," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–15. https://doi.org/10.1155/2021/8818681

[31] P. Yin, F. Liu, Z. Li, B. Pan, and T. Liu, "Evaluation on the Adhesion Property of Recycled Asphalt Based on the Multi-Scale Experiments," *Buildings*, vol. 14, no. 8, p. 2365, 2024. https://doi.org/10.3390/buildings14082365